

学校编码: 10384  
学号: 23320081153279

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**水声通信中双曲调频同步与调制技术研究**  
**Research on Hyperbolic Frequency Modulated**  
**Synchronization and Modulation Technology in Underwater**  
**Acoustic Communication**

冯 玮

指导教师姓名: 许 肖 梅 教授  
专 业 名 称: 通信与信息系统  
论文提交日期: 2011 年 5 月  
论文答辩时间: 2011 年 6 月  
学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘 要

海洋为人类的生存和发展提供了广阔的前景，已成为当今世界的重要话题。水声通信解决水下信息的可靠传输与交换问题，在海洋资源开发、海洋国防安全、地震或海啸预警、海洋环境监测和水下科考等领域都扮演着重要的角色，是海洋信息领域需要解决的关键技术问题。

浅海水声信道是迄今为止最为复杂的无线通信信道之一。它固有的时-空-频变以及窄带、高噪、强多途干扰、长传输时延、大随机起伏等特征，使得浅海水声通信系统在有效性和可靠性等通信性能的提高上面临着巨大挑战。

本文首先分析了海洋中声波的传播特性及浅海水声信道的主要特点，针对浅海水声信道多途强、起伏大、多普勒效应严重等特点，展开了浅海通信系统中帧同步方法和调制技术的研究。论文分析总结了水声通信帧同步及扩频调制的相关资料，在此基础上提出了一种基于双曲调频（Hyperbolic Frequency Modulated, HFM）信号的帧同步方案；以 Chirp 扩频（Chirp Spread Spectrum, CSS）技术为基础，将 HFM 信号应用于调制中，提出一种双曲调频扩频（HFM Spread Spectrum, HFM-SS）调制方案；最后以 LabVIEW 8.6 为核心平台，配以必要的外围设备，构建了一套点对点的实时水声通信系统。系统在实验室水池和厦门大学水库进行了多次实验。实验结果表明，系统能够在低发射功率的条件下实现稳健可靠的通信。

论文的主要工作如下：

1. 系统介绍了国内外在水声通信技术领域的研究概况，分析了海洋中声波的传播特性、浅海水声信道的主要特点及其对水声通信性能的影响；
2. 针对浅海水声通信中最为关键的同步问题，开展了浅海水声通信帧同步方法的研究，提出了一种双 HFM 信号同步方法。分析了水声通信帧同步方法中几种常用的信号及其时频特性和相关的处理方法以及在水声通信帧同步中的应用，提出一种采用相关检测方法的双 HFM 信号同步法来实现水声通信中的帧同步，并在有多普勒效应的条件下对其性能进行仿真研究；
3. 针对浅海水声信道特点，开展了浅海水声通信调制技术的研究，提出了双

曲调频扩频 (HFM-SS) 调制方法。分析总结了应用于水声通信系统中的跳频 (Frequency Hopping, FH) 扩频和 Chirp 扩频技术的原理及特点, 提出一种基于 HFM 信号的扩频调制方法, 称之为双曲调频扩频调制方法, 并在浅海水声信道模型下对其性能进行仿真研究;

4. 在上述工作基础上, 论文以 LabVIEW 8.6 为核心平台, 配以必要的外围设备, 设计并实现了一套浅海水声信道抗多途通信系统, 其中包含了浅海水声实时通信中的关键技术: 帧同步方法和调制技术。在实验室水池和厦门大学水库进行了多次实验, 取得了良好的测试效果。

**关键词:** 水声通信; 双曲调频信号; 帧同步; 多普勒效应; Chirp 扩频; 双曲调频扩频

## Abstract

The ocean provides a broad prospect for people's survival and development, which has become a hot topic in recent years. Underwater acoustic communication (UAC), realizing a reliable information transmission and exchange in the ocean, plays an important part in various application areas such as exploration of the ocean, marine national security, earthquake, tsunami early warning, marine monitoring and underwater expedition.

Shallow water acoustic channel is one of the most complex wireless communication channels. The inherent characteristics, such as space-time-frequency varying, narrow-band, high-noise, strong multipath interference, long transmission delay, large fluctuation, etc., making effectiveness and reliability performance of shallow water acoustic communication face enormous challenges.

In this dissertation, the propagation of sound in ocean and the characteristics of shallow water acoustic channel are studied theoretically at first. Due to the large delay spread caused by multipath propagation and the severe Doppler Effect of the channel, frame synchronization and modulation methods for UAC on mobile platforms have been researched. Many materials and essays about frame synchronization and modulation for UAC have been referred and analyzed. The new frame synchronization method is proposed to work with a robust acquisition performance based on the characteristic of Hyperbolic Frequency Modulated (HFM) signal. Moreover, HFM signals have been adopted into the improvement of the modulation method based on the Chirp Spread Spectrum (CSS). Last but not the least, a point-to-point UAC system developed by LabVIEW 8.6 has been tested in the pool tank and the reservoir of Xiamen University, where some favorable results have been obtained. The experimental results show that the system is able to achieve a robust and reliable communication under conditions of low transmission power.

The main work of this dissertation is listed below:

1. Researches in the field of UAC technology are introduced objectively. The features of shallow water acoustic channel and their impacts on the UAC are analyzed;
2. The most critical issue for realtime shallow water acoustic communication - synchronization is researched, a double HFM signals for synchronization method is proposed. Some common frame synchronization signals and their time-frequency characteristics and related processing methods for frame synchronization in UAC are analyzed. Moreover, a frame synchronization method using double HFM signals based on correlation detection is proposed, which is testified to achieve frame synchronization under Doppler Effect in UAC by simulations.
3. Due to the characteristics of shallow water acoustic channel, modulation technology for shallow water acoustic communication is investigated, and a HFM Spread Spectrum (HFM-SS) modulation method is proposed. Analysis and summarizations on the principles and the characteristics of the Frequency Hopping (FH) and CSS for UAC are presented. Furthermore, a spread spectrum modulation using HFM signal named as “HFM Spread Spectrum modulation” for UAC is proposed, and its performance under shallow water acoustic channel model is studied via simulations;
4. Based on the above work, a set of anti-multipath communication system under shallow water acoustic channel, using the core platform of LabVIEW 8.6, together with the necessary peripherals, has been designed and implemented, which includes the key technologies of real-time UAC: frame synchronization and modulation techniques.

**Key words:** Underwater Acoustic Communication; HFM Signal; Frame Synchronization; Doppler Effect; Chirp Spread Spectrum; HFM Spread Spectrum

# 目 录

摘 要.....	I
图索引.....	IX
表索引.....	XII
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 研究背景及意义.....	1
1.3 水声通信技术进展概况.....	2
1.3.1 国外水声通信研究进展.....	4
1.3.2 国内水声通信研究进展.....	6
1.4 论文主要研究内容.....	7
<b>第二章 浅海水声信道的声传输特性.....</b>	<b>9</b>
2.1 引言 .....	9
2.2 海洋声学特性.....	9
2.2.1 海水中的声速.....	10
2.2.2 浅海声速分布.....	11
2.2.3 浅海环境噪声.....	11
2.3 浅海声传播衰减.....	13
2.4 浅海水声信道的特点.....	15
2.4.1 浅海水声信道的复杂性.....	15
2.4.2 浅海水声信道的多变性.....	16
2.4.3 浅海水声信道的强多途.....	17
2.4.4 浅海水声信道的多普勒效应.....	18
2.5 浅海水声信道模型.....	19
2.6 小结 .....	21



<b>第三章 水声通信中双 HFM 信号帧同步方法研究.....</b>	<b>22</b>
3.1 引言 .....	22
3.2 水声通信帧同步方法常用信号分析.....	23
3.2.1 信号分析 .....	23
3.2.2 信号处理 .....	26
3.2.3 多普勒特性分析.....	27
3.3 水声通信中常用帧同步方法描述.....	31
3.3.1 帧同步的概念.....	31
3.3.2 水声通信中的帧同步方法.....	32
3.4 水声通信系统双 HFM 帧同步方法的提出和设计 .....	37
3.4.1 双 HFM 信号同步方法.....	37
3.4.2 仿真结果 .....	39
3.5 小结 .....	41
<b>第四章 水声通信中双曲调频扩频调制技术研究.....</b>	<b>42</b>
4.1 引言 .....	42
4.2 跳频扩频技术.....	42
4.2.1 扩频通信概述.....	42
4.2.2 跳频扩频原理.....	44
4.2.3 跳频技术特点.....	46
4.3 Chirp 扩频技术.....	46
4.4.1 Chirp 扩频原理 .....	47
4.4.2 Chirp 扩频特点 .....	49
4.4.3 水声通信中的应用.....	51
4.5 双曲调频扩频技术.....	55
4.5.1 双曲调频扩频原理.....	55
4.5.2 性能仿真 .....	56
4.5.3 双曲调频扩频特点.....	57
4.6 小结 .....	57
<b>第五章 基于 LabVIEW 的水声通信系统设计与实现.....</b>	<b>58</b>
5.1 引言 .....	58

<b>5.2 LabVIEW 开发平台简介 .....</b>	<b>58</b>
<b>5.3 发射系统设计与实现 .....</b>	<b>60</b>
5.3.1 发送数据结构.....	60
5.3.2 发射系统界面.....	64
<b>5.4 接收系统设计与实现 .....</b>	<b>65</b>
5.4.1 帧同步检测.....	66
5.4.2 数据解调方案.....	66
5.4.3 接收系统界面.....	66
<b>5.5 小结 .....</b>	<b>68</b>
<b>第六章 水声通信实验及结果分析 .....</b>	<b>69</b>
<b>6.1 引言 .....</b>	<b>69</b>
<b>6.2 部重水池实验及结果分析 .....</b>	<b>69</b>
6.2.1 信道测试实验.....	70
6.2.2 同步性能测试.....	72
6.2.3 调制性能测试.....	72
6.2.4 文本传输 .....	73
6.2.5 图像传输 .....	74
<b>6.3 厦门大学水库实验及结果分析 .....</b>	<b>74</b>
6.3.1 信道测试 .....	75
6.3.2 调制性能测试.....	75
6.3.3 文本传输 .....	76
6.3.4 图像传输 .....	76
<b>6.4 小结 .....</b>	<b>77</b>
<b>第七章 总结与讨论 .....</b>	<b>78</b>
7.1 主要工作和创新 .....	78
7.2 待进一步研究的工作 .....	79
<b>参考文献 .....</b>	<b>80</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>88</b>
<b>附录 主要程序说明 .....</b>	<b>89</b>

攻读硕士学位期间发表的论文 .....	90
---------------------	----

厦门大学博硕士论文摘要库

## 图索引

图 1.1 水声通信系统示意图.....	3
图 1.2 水声通信的发展历程.....	3
图 1.3 水声通信网络立体结构示意图.....	4
图 1.4 水声通信产品.....	6
图 2.1 台湾海峡南部海域的声速分布图.....	10
图 2.2 典型海洋声速分布.....	11
图 2.3 浅海环境噪声谱.....	12
图 2.4 厦门公路桥附近海洋环境噪声谱级.....	13
图 2.5 SNR 与距离、信号频率的关系.....	15
图 2.6 浅海水声信道的频变、空变、时变特性.....	16
图 2.7 浅海中的多途传播形式.....	17
图 2.8 浅海水声信道模型.....	20
图 3.1 CW 信号的波形和功率谱.....	23
图 3.2 Chirp 信号波形和功率谱.....	24
图 3.3 HFM 信号的波形和功率谱.....	25
图 3.4 用 FFT 实现匹配滤波器的输出.....	27
图 3.5 Chirp 信号有无多普勒的时频曲线对比.....	28
图 3.6 有多普勒情况下 Chirp 信号的相关输出.....	29
图 3.7 多普勒频偏产生的 Chirp 信号数据帧长度变化.....	29
图 3.8 HFM 信号有无多普勒的时频对比.....	30
图 3.9 多普勒情况下 HFM 信号的相关输出.....	31
图 3.10 时频同步头格式.....	32
图 3.11 时频编码同步解调形成原理.....	32
图 3.12 匹配滤波粗同步原理图.....	33
图 3.13 Chirp 同步信号相关处理.....	33
图 3.14 Benthos 多通道“MFSK”信号结构图.....	35
图 3.15 Benthos 帧同步同步发送接收端流程图.....	35

图 3.16 HFM 和 CW 联合同步法在相对运动下的同步性能 .....	36
图 3.17 三种双 HFM 同步方法的时频图 .....	38
图 3.18 双 HFM 同步信号的时频图 .....	38
图 3.19 多普勒估计 .....	39
图 3.20 Chirp 信号与 HFM 信号的同步时间误差对比 .....	40
图 3.21 Chirp 信号与 HFM 信号估计的相对速度误差对比 .....	40
图 4.1 跳频系统原理框图 .....	44
图 4.2 跳频时频矩阵图 .....	44
图 4.3 快跳频示意图 .....	45
图 4.4 慢跳频示意图 .....	45
图 4.5 Sinc 脉冲信号的时域波形和频谱 .....	47
图 4.6 Chirp 脉冲信号的时域波形和频谱 .....	48
图 4.7 MDMA 的基本信号形式 .....	48
图 4.8 MDMA 的动态传输模型 .....	49
图 4.9 0dB 窄带噪声对 Chirp 信号的影响 .....	50
图 4.10 0dB 宽带噪声对 Chirp 信号的影响 .....	50
图 4.11 上扫 Chirp 信号与下扫 Chirp 信号的时频图 .....	51
图 4.12 二元正交 CSS 调制信号 .....	53
图 4.13 四元正交 CSS 调制序列 .....	53
图 4.14 Chirp 载波调制基本原理 .....	54
图 4.15 HFM-SS 方案原理 .....	55
图 4.16 4 元 HFM-SS 调制信号时频图 .....	56
图 4.17 三径水声信道中 4FSK-FH 与 HFM-SS 性能对比 .....	57
图 5.1 iPhone 模拟程序 .....	59
图 5.2 开发软硬件平台示意图 .....	60
图 5.3 发射系统框图 .....	60
图 5.4 跳频图案 .....	62
图 5.5 发送信号结构图 .....	63
图 5.6 唤醒信号的时频图 .....	63

图 5.7 发送信号的时频图.....	64
图 5.8 发送端主程序界面.....	64
图 5.9 发送端数据处理流程图.....	65
图 5.10 接收系统结构图.....	65
图 5.12 接收端主程序界面.....	66
图 5.13 接收端程序流程图.....	67
图 6.1 部重水池实验水声换能器布置示意图.....	70
图 6.2 部重水池中不同位置的多途测试结果.....	71
图 6.3 接收到 15kHz 的 CW 信号的时频图 .....	72
图 6.4 部重水池文本传输结果.....	73
图 6.5 部重水池图像传输结果.....	74
图 6.6 厦大水库信道多途测试结果.....	75
图 6.7 厦大水库文本传输结果.....	76
图 6.8 厦大水库图像传输实验.....	76

## 表索引

表 3.1 HFM、CW 参数设置 .....	36
表 3.2 双 HFM 信号帧同步仿真设置 .....	39
表 3.3 双 HFM 信号帧同步仿真结果 .....	40
表 5.1 CW+Chirp 帧同步信号参数 .....	61
表 5.2 双 HFM 帧同步参数 .....	61
表 5.3 4FSK-FH 频率点分布 .....	62
表 5.4 HFM-SS 调制参数设计 .....	62
表 6.1 部重水池实验内容列表 .....	70
表 6.2 水声信道接收信噪比结果 .....	71
表 6.3 帧同步性能测试结果 .....	72
表 6.4 调制性能测试结果 .....	73
表 6.5 厦大水库实验内容列表 .....	75
表 6.6 厦大水库调制性能测试 .....	76

## Table of Contents

<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>Figure Caption .....</b>	<b>IX</b>
<b>Table List.....</b>	<b>XII</b>
<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Forward .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Research Background .....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 Underwater Acoustic Communication Overview .....</b>	<b>2</b>
1.3.1 Abroad Underwater Acoustic Communications Progress.....	4
1.3.2 Domestic Underwater Acoustic Communications Progress .....	6
<b>1.4 Thesis Research.....</b>	<b>7</b>
<b>Chaper 2 Characteristics of Shallow Water Acoustic Channel .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Forward .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Marine Acoustic Characteristics .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 The Speed of Sound in the Sea .....	10
2.2.2 Sound Velocity Distribution in Shallow Water .....	11
2.2.3 Ambient Noise in Shallow Water .....	11
<b>2.3 Transmission Loss in Shallow Water .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Main Charateristics of Shallow Water Acoustic Channel .....</b>	<b>15</b>
2.4.1 Complexity of Shallow Water Acoustic Channel.....	15
2.4.2 Variety of Shallow Water Acoustic Channel .....	16
2.4.3 Strong Multipath of Shallow Water Acoustic Channel .....	17
2.4.4 Doppler Effect of Shallow Water Acoustic Channel.....	18
<b>2.5 Shallow Water Acoustic Channel Models.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Summary .....</b>	<b>21</b>



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库